

Verfahren zur Herstellung eines Lochs und Vorrichtung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines  
5   Lochs gemäß Anspruch 1, bei dem mittels zumindest eines  
Lasers und gepulster Laserstrahlen in einem Bauteil ein Loch  
erzeugt wird und eine Vorrichtung zur Durchführung des Ver-  
fahrens gemäß Anspruch 16.

10   Bei vielen Bauteilen, insbesondere bei Gussteilen, müssen  
nachträglich Abtragungen wie Vertiefungen oder Durchgangslö-  
cher erzeugt werden. Insbesondere bei Turbinenbauteilen, die  
zur Kühlung Filmkühllöcher aufweisen, werden nach der Her-  
stellung des Bauteils Löcher nachträglich eingefügt.  
15   Solche Turbinenbauteile weisen oft auch Schichten auf, wie  
z.B. eine metallische Zwischenschicht und/oder eine kerami-  
sche äußere Schicht. Die Filmkühllöcher müssen dann durch die  
Schichten und das Substrat (Gussteil) hindurch erzeugt wer-  
den.  
20   Die US-PS 6,172,331 sowie die US-PS 6,054,673 offenbaren eine  
Laserbohrmethode, um in Schichtsystemen Löcher einzufügen,  
wobei ultrakurze Laserpulslängen verwendet werden.  
25   Es wird aus einem bestimmten Laserpulslängenbereich eine  
Laserpulslänge ausgesucht und damit das Loch erzeugt.  
30   Die DE 100 63 309 A1 offenbart ein Verfahren zur Herstellung  
einer Kühlluftöffnung mittels eines Lasers, bei dem die  
Laserparameter so eingestellt werden, dass Material durch  
Sublimieren abgetragen wird.  
35   Die Verwendung von solchen ultrakurzen Laserpulsen ist wegen  
deren geringen mittleren Leistungen teuer und sehr zeitinten-  
siv.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung dieses Problem zu überwinden.

Die Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1,  
5 bei dem verschiedene Laserpulslängen verwendet werden.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn nur in einem der ersten  
Verfahrensschritte kurze Laserpulslängen verwendet werden, um  
optimale Eigenschaften in einem äußeren Oberbereich der  
10 Trennfläche zu erzeugen, da diese entscheidend sind für das  
Ausströmverhalten eines Mediums aus dem Loch sowie für das  
Umströmverhalten eines Mediums um dieses Loch.  
Im Inneren des Lochs sind die Eigenschaften der Trennfläche  
eher unkritisch, so dass dort längere Laserpulslängen verwen-  
15 det werden können, die inhomogene Trennflächen verursachen  
können.

Eine weitere Aufgabe ist es, eine Vorrichtung aufzuzeigen mit  
20 der das Verfahren einfach und schnell durchgeführt werden  
kann.

Diese Aufgabe wird gelöst durch eine Vorrichtung gemäß An-  
spruch 16.

25 In den Unteransprüchen sind weitere vorteilhafte Maßnahmen  
des Verfahrens aufgelistet.  
Die in den Unteransprüchen aufgelisteten Maßnahmen können in  
vorteilhafter Art und Weise miteinander kombiniert werden.

30

Die Erfindung wird anhand der Figuren näher erläutert.

35

Es zeigen

Figur 1 ein Loch in einem Substrat,  
Figur 2 ein Loch in einem Schichtsystem,  
5 Figur 3,4,5,6,7,8,9 Verfahrensschritte des erfindungsgemäßen  
Verfahrens,  
Figur 10 zeigt eine Apparatur, um das Verfahren  
durchzuführen,  
Figur 11 eine Turbinenschaufel,  
10 Figur 12 eine Gasturbine und  
Figur 13 eine Brennkammer.

Figur 1 zeigt ein Bauteil 1 mit einem Loch 7.  
15 Das Bauteil 1 besteht aus einem Substrat 4 (beispielsweise  
Gussteil).  
Das Substrat 4 kann metallisch und/oder keramisch sein. Ins-  
besondere bei Turbinenbauteilen, wie z.B. Turbinenlauf- 120  
(Fig. 10, 11) oder -leitschaufeln 130 (Fig. 11), Brennkammer-  
20 auskleidungen 155 (Fig. 12) sowie anderen Gehäuseteilen einer  
Dampf- oder Gasturbine 100 (Figur 11, aber auch Flugzeugtur-  
bine), besteht das Substrat 4 aus einer nickel-, kobalt- oder  
eisenbasierten Superlegierung.  
Das Substrat 4 weist ein Loch 7 auf, das beispielsweise ein  
25 Durchgangsloch ist. Es kann auch ein Sackloch sein.  
Das Loch 7 besteht aus einem unteren Bereich 10 in einem  
unteren Bereich des Lochs 7, der beispielsweise symmetrisch  
und beispielsweise auch kreisförmig ausgebildet ist, und  
einem Diffusor 13 an einer Oberfläche 14 des Substrats 4. Der  
30 Diffusor 13 stellt beispielsweise eine Verbreiterung im Quer-  
schnitt gegenüber dem Teil 10 des Lochs 7 dar.  
Das Loch 7 ist z.B. ein Filmkühlloch. Insbesondere die innen-  
liegende Oberfläche des Diffusors 13 soll eben sein, um ein  
optimales Ausströmen eines Mediums aus dem Loch 7 zu ermögli-  
35 chen.

Figur 2 zeigt ein Bauteil 1, das als Schichtsystem ausgeführt ist.

Auf dem Substrat 4 ist zumindest eine Schicht 16 vorhanden.

Dies kann beispielsweise eine metallische Legierung des Typs

5 MCrAlX sein, wobei M für zumindest ein Element der Gruppe Eisen, Kobalt oder Nickel steht. X steht für Yttrium und/oder zumindest ein Element der Seltenen Erden.

Die Schicht 16 kann auch keramisch sein.

10 Auf dieser Schicht kann noch eine weitere Schicht (nicht dargestellt) vorhanden sein, beispielsweise eine keramische Schicht, insbesondere eine Wärmedämmsschicht.

Die Wärmedämmsschicht ist beispielsweise eine vollständig oder teilstabilisierte Zirkonoxidschicht, insbesondere eine EB-

15 PVD-Schicht oder plasmagespritzte (APS, LPPS, VPS) Schicht.

In dieses Schichtsystem wird ebenfalls ein Loch 7 mit den zwei Teilbereichen 10 und 13 eingebracht.

20 Die Ausführungen zur Herstellung des Lochs 7 gelten für Substrate 4 mit und ohne Schicht oder Schichten.

Figur 3 und 4 zeigen Verfahrensschritte des erfindungsgemäßen Verfahrens.

25 Erfindungsgemäß werden verschiedene Laserpulslängen während des Verfahrens verwendet, insbesondere bei einem der ersten Verfahrensschritte werden sehr kleine Laserpulslängen kleiner 100 ns (Nanosekunden), insbesondere kleiner 50 ns verwendet. Es können auch Laserpulslängen kleiner Pikosekunden oder

30 Femtosekunden verwendet werden.

Bei der Verwendung von sehr kurzen Laserpulslängen kleiner 100 ns, insbesondere kleiner 50 ns werden nahezu keine Aufschmelzungen im Bereich der Trennfläche erzeugt. Somit bilden sich dort keine Risse aus und exakte Geometrien können so erzeugt werden.

In einem der ersten Verfahrensschritte wird ein erster Teilbereich des Lochs 7 in dem Bauteil 1 erzeugt. Dies kann zumindest teilweise oder ganz dem Diffusor 13 entsprechen (Fig. 4, 7, 8).

5 Insbesondere, aber nicht notwendigerweise, wenn eine metallische Zwischenschicht oder das metallische Substrat 4 erreicht wird, werden Laserpulslängen größer als 50·ns, insbesondere größer als 100 ns und insbesondere bis 10 ms verwendet, um den restlichen (zweiten) Teilbereich 10 des Lochs 7 zu  
10 erzeugen, wie es in Figur 1 oder 2 dargestellt ist.

Die Laserpulslängen eines einzigen Lasers 19 können kontinuierlich verändert werden, beispielsweise vom Beginn bis zum Ende des Verfahrens. Der Beginn des Verfahrens liegt bei der Abtragung von Material an der äußeren Oberfläche 14 und das  
15 Ende des Verfahrens liegt in der Tiefe des Lochs 7.

Das Material wird beispielsweise schichtweise in einer Ebene 11 (Fig. 6) und in einer Axialrichtung 15 abgetragen.

Das Verfahren kann angewendet werden bei neu hergestellten  
20 Bauteilen 1, die zum ersten Mal abgegossen wurden.

Ebenso kann das Verfahren verwendet werden bei wieder aufzuarbeitenden Bauteilen 1.  
Wiederaufarbeitung (Refurbishment) bedeutet, dass Bauteile 1,  
25 die im Einsatz waren, beispielsweise von Schichten getrennt werden und nach Reparatur wie z.B. Auffüllen von Rissen und Entfernung von Oxidations- und Korrosionsprodukten wieder neu beschichtet werden.

Hier werden beispielsweise Verunreinigungen oder Beschichtungsmaterial, das erneut aufgebracht wurde (Fig. 7) und in die Löcher 7 gelangte, mit einem Laser 19, 19' entfernt.

Bei dem Verfahren können zumindest zwei oder mehr Laser 19, 19' verwendet werden, die beispielsweise nacheinander eingesetzt werden. Die verschiedenen Laser 19, 19' weisen verschiedene Bereiche hinsichtlich ihrer Laserpulslängen auf. So kann z.B. ein erster Laser 19 Laserpulslängen kleiner 100 ns,

insbesondere kleiner 50 ns erzeugen und ein zweiter Laser 19' Laserpulslängen größer 50 ns, insbesondere größer 100 ns erzeugen.

Zur Erzeugung eines Lochs 7 wird zuerst der erste Laser 19  
5 eingesetzt. Für die weitere Bearbeitung wird dann der zweite Laser 19' verwendet.

Figur 5 zeigt einen Querschnitt durch ein Loch 7.

10 Auch hier erfolgt zuerst eine Grobbearbeitung mit Laserpulslängen größer als 50 ns, insbesondere größer 100 ns und eine Feinbearbeitung mit Laserpulslängen kleiner 100 ns, insbesondere kleiner 50 ns.

Der untere Teilbereich 10 des Lochs 7 wird vollständig und  
15 der Bereich des Diffusors 13 wird fast vollständig mit einem Laser, der Laserpulslängen größer als 50 ns, insbesondere größer 100 ns aufweist, bearbeitet.

Zur Fertigstellung des Lochs 7 bzw. des Diffusors 13 muss nur noch ein dünner Oberbereich 28 im Bereich des Diffusors 13  
20 mittels eines Lasers 19, 19', der Laserpulslängen kleiner 100 ns, insbesondere kleiner 50 ns erzeugen kann, bearbeitet werden.

25 Figur 6 zeigt eine Draufsicht auf ein Loch 7 des Bauteils 1. Die verschiedenen Laser 19, 19' bzw. die verschiedenen Laserpulslängen dieser Laser 19, 19' werden in verschiedenen Verfahrensschritten eingesetzt.

Zuerst erfolgt beispielsweise eine Grobbearbeitung mit großen Laserpulslängen (> 50 ns, insbesondere >100 ns). Dadurch wird der größte Teil des Lochs 7 erzeugt. Dieser innere Bereich ist mit dem Bezugszeichen 25 gekennzeichnet. Nur noch ein äußerer Oberbereich 28 des Lochs 7 bzw. des Diffusors 13 muss entfernt werden, um die Endmaße des Lochs 7 zu erreichen  
30 (Fig. 8, der äußere Oberbereich 28 ist gestrichelt angedeutet). Erst wenn der äußere Oberbereich 28 mittels eines Lasers 19, 19' mit sehr kurzen Laserpulslängen (< 100 ns,

insbesondere < 50 ns) bearbeitet worden ist, ist das Loch 7 bzw. der Diffusor 13 fertiggestellt.

Die Kontur 29 des Diffusors 13 wird also mit sehr kurzen Laserpulslängen hergestellt, d.h. wodurch der äußere Oberbereich 28 abgetragen wird, und ist somit frei von Rissen und Aufschmelzungen.

Das Material wird beispielsweise in einer Ebene 11 (senkrecht zur Axialrichtung 15) abgetragen.

- 10 Eine Alternative bei der Herstellung des Lochs 7 besteht darin, zuerst den äußeren Oberbereich 28 mit kurzen Laserpulslängen (< 100 ns), bis zu einer Tiefe in Axialrichtung 15, die einer Ausdehnung des Diffusors 13 des Lochs 7 in dieser Richtung 15 teilweise oder ganz entspricht, zu erzeugen (Fig. 7, der innere Bereich 25 ist gestrichelt angedeutet). Somit werden nahezu keine Aufschmelzungen im Bereich der Trennfläche des Diffusors 13 erzeugt und es bilden sich dort keine Risse aus und exakte Geometrien können so erzeugt werden. Dann erst wird der innere Bereich 25 mit größeren Laserpuls-
- 15 längen (> 50 ns, insbesondere > 100 ns) abgetragen.
- 20

Figur 9 zeigt die Nachbearbeitung (Refurbishment) eines Lochs 7, wobei bei einer Beschichtung des Substrats 4 mit dem Material der Schicht 16 Material in das bereits vorhandene Loch 7 eingedrungen ist.

Beispielsweise können die tiefer liegenden Bereiche im Bereich 10 des Lochs 7 mit einem Laser bearbeitet werden, der Laserpulslängen größer 50ns, insbesondere größer 100 ns aufweist. Diese Bereiche sind mit 25 gekennzeichnet.

Der kritischere Oberbereich 28 beispielsweise im Bereich des Diffusors 13, auf dem Verschmutzungen vorhanden sind, wird mit einem Laser 19' bearbeitet, der Laserpulslängen kleiner 100 ns, insbesondere kleiner 50 ns aufweist.

Figur 10 zeigt beispielhaft eine erfindungsgemäße Vorrichtung 40, um das erfindungsgemäße Verfahren durchzuführen.

Die Vorrichtung 40 besteht beispielsweise aus zumindest einer Optik 35, hier einer Optik 35, insbesondere einer Linse, die einen Laserstrahl 22 auf das Substrat 4 lenkt, um das Durchgangsloch 10 zu erzeugen.

Es werden zumindest zwei Laser 19, 19' verwendet. Die Laserstrahlen 22', 22'' können über Spiegel 31, 33 zur Optik 35 hingeführt werden.

10

Die Spiegel 31, 33 sind verschieb- oder drehbar, so dass jeweils nur ein Laser 19, 19' seine Laserstrahlen 22' oder 22'' über die Spiegel 31 oder 33 und die Linse 35 auf das Bauteil 1 sendet.

15

Auch können die Laserstrahlen 22' oder 22'' über eine Optik oder zwei, ggf. mehrere, Optiken auf das Bauteil gleichzeitig gelenkt werden, wenn verschiedene Bereiche in einer Ebene abgetragen werden. So können z.B. der äußere Bereich 28 mit kurzen Laserpulslängen und der innere Bereich 25 mit größeren 20 Laserpulslängen gleichzeitig hergestellt werden.

Die Laser 19, 19' können Wellenlängen von 1064 nm oder 532 nm aufweisen. Die Laser 19, 19' können verschiedene Wellenlängen aufweisen.

25

Ebenso weist beispielsweise der Laser 19 Pulslängen von 0,05 - 5 ms auf; hingegen weist der Laser 19' Pulslängen von 50 - 500 ns auf.

30

Somit kann durch Verschieben der Spiegel 31, 33 jeweils der Laser 19, 19' mit seinen entsprechenden Laserpulslängen über die Optik 35 auf das Bauteil 1 eingekoppelt werden, die notwendig sind, um beispielsweise den äußeren Oberbereich 28 oder den Innenbereich 25 herzustellen.

Sowohl die Spiegel 31, 33, die Optik oder das Substrat 4 können so verschoben werden, dass Material flächig vom Substrat 4 gemäss den Figuren 3 bis 9 abgetragen wird.

35

Wird beispielsweise zuerst der äußere Oberbereich 28 gemäß Figur 6 hergestellt, so wird der Laser mit den kleinen Laserpulslängen 19' eingekoppelt. Wird dann der innere Bereich 25

hergestellt, so wird durch Bewegung des Spiegels 33 der Laser 19' ausgekoppelt und durch Bewegung des Spiegels 31 der Laser 19 mit seinen größeren Laserpulslängen 10 eingekoppelt.

5

Figur 11 zeigt in perspektivischer Ansicht eine Schaufel 120, 130, die sich entlang einer Längsachse 121 erstreckt, in die beispielsweise Filmkühllöcher, beispielsweise mit einem Dif-fusor 13, einzubringen sind.

- 10 Die Schaufel 120, 130 weist entlang der Längsachse 121 auf-einander folgend einen Befestigungsbereich 400, eine daran angrenzende Schaufelplattform 403 sowie einen Schaufelblatt-bereich 406 auf. Im Befestigungsbereich 400 ist ein Schaufel-fuß 183 gebildet, der zur Befestigung der Laufschaufeln 120,
- 15 130 an der Welle dient. Der Schaufelfuß 183 ist als Hammer-kopf ausgestaltet. Andere Ausgestaltungen, beispielsweise als Tannenbaum- oder Schwälbenschwanzfuß sind möglich. Bei her-kömmlichen Schaufeln 120, 130 werden in allen Bereichen 400, 403, 406 der Laufschaufel 120, 130 massive metallische Werk-stoffe verwendet. Die Laufschaufel 120, 130 kann hierbei durch ein Gussverfahren, durch ein Schmiedeverfahren, durch ein Fräswerfahren oder Kombinationen daraus gefertigt sein.
- 25 Die Figur 12 zeigt beispielhaft eine Gasturbine 100 in einem Längsteilschnitt.  
Die Gasturbine 100 weist im Inneren einen um eine Rotations-achse 102 drehgelagerten Rotor 103 auf, der auch als Turbi-nenläufer bezeichnet wird.
- 30 Entlang des Rotors 103 folgen aufeinander ein Ansauggehäuse 104, ein Verdichter 105, eine beispielsweise torusartige Brennkammer 110, insbesondere Ringbrennkammer 106, mit meh-re-rem koaxial angeordneten Brennern 107, eine Turbine 108 und das Abgasgehäuse 109.
- 35 Die Ringbrennkammer 106 kommuniziert mit einem beispielsweise ringförmigen Heißgaskanal 111. Dort bilden beispielsweise

vier hintereinandergeschaltete Turbinenstufen 112 die Turbine 108.

Jede Turbinenstufe 112 ist aus zwei Schaufelringen gebildet.

In Strömungsrichtung eines Arbeitsmediums 113 gesehen folgt

5 im Heißgaskanal 111 einer Leitschaufelreihe 115 eine aus Laufschaufeln 120 gebildete Reihe 125.

Die Leitschaufeln 130 sind dabei an einem Innengehäuse 138

eines Stators 143 befestigt, wohingegen die Laufschaufeln 120

10 einer Reihe 125 beispielsweise mittels einer Turbinenscheibe 133 am Rotor 103 angebracht sind. An dem Rotor 103 angekoppelt ist ein Generator oder eine Arbeitsmaschine (nicht dargestellt).

15 Während des Betriebes der Gasturbine 100 wird vom Verdichter 105 durch das Ansauggehäuse 104 Luft 135 angesaugt und verdichtet. Die am turbinenseitigen Ende des Verdichters 105 bereitgestellte verdichtete Luft wird zu den Brennern 107 geführt und dort mit einem Brennmittel vermischt. Das Gemisch wird dann unter Bildung des Arbeitsmediums 113 in der Brennkammer 110 verbrannt.

Von dort aus strömt das Arbeitsmedium 113 entlang des Heißgaskanals 111 vorbei an den Leitschaufeln 130 und den Laufschaufeln 120. An den Laufschaufeln 120 entspannt sich das 25 Arbeitsmedium 113 impulsübertragend, so dass die Laufschaufeln 120 den Rotor 103 antreiben und dieser die an ihn angekoppelte Arbeitsmaschine.

30 Die dem heißen Arbeitsmedium 113 ausgesetzten Bauteile unterliegen während des Betriebes der Gasturbine 100 thermischen Belastungen. Die Leitschaufeln 130 und Laufschaufeln 120 der in Strömungsrichtung des Arbeitsmediums 113 gesehen ersten Turbinenstufe 112 werden neben den die Ringbrennkammer 106 auskleidenden Hitzeschildsteinen am meisten thermisch belastet.

Um den dort herrschenden Temperaturen standzuhalten, werden diese mittels eines Kühlmittels gekühlt.

Ebenso können die Substrate eine gerichtete Struktur aufweisen, d.h. sie sind einkristallin (SX-Struktur) oder weisen nur längsgerichtete Körner auf (DS-Struktur).

Als Material werden eisen-, nickel- oder kobaltbasierte

5 Superlegierungen verwendet.

Ebenso können die Schaufeln 120, 130 Beschichtungen gegen Korrosion (MCrAlX; M ist zumindest ein Element der Gruppe Eisen (Fe), Kobalt (Co), Nickel (Ni), X steht für Yttrium (Y) und/oder zumindest ein Element der Seltenen Erden) und Wärme 10 durch eine Wärmedämmsschicht aufweisen. Die Wärmedämmsschicht besteht beispielsweise ZrO<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>, d.h. sie ist nicht teilweise oder vollständig stabilisiert durch Yttriumoxid und/oder Kalziumoxid und/oder Magnesiumoxid.

Durch geeignete Beschichtungsverfahren wie z.B. Elektronen-

15 strahlverdampfen (EB-PVD) werden stängelförmige Körner in der Wärmedämmsschicht erzeugt.

Die Leitschaufel 130 weist einen dem Innengehäuse 138 der Turbine 108 zugewandten Leitschaufelfuß (hier nicht darge-

20 stellt) und einen dem Leitschaufelfuß gegenüberliegenden Leitschaufelkopf auf. Der Leitschaufelkopf ist dem Rotor 103 zugewandt und an einem Befestigungsring 140 des Stators 143 festgelegt.

25

Die Figur 13 zeigt eine Brennkammer 110 einer Gasturbine.

Die Brennkammer 110 ist beispielsweise als so genannte Ringbrennkammer ausgestaltet, bei der eine Vielzahl von in Umfangsrichtung um die Turbinenwelle 103 herum angeordneten

30 Brennern 102 in einen gemeinsamen Brennkammerraum münden.

Dazu ist die Brennkammer 110 in ihrer Gesamtheit als ringförmige Struktur ausgestaltet, die um die Turbinenwelle 103 herum positioniert ist.

35 Zur Erzielung eines vergleichsweise hohen Wirkungsgrades ist die Brennkammer 110 für eine vergleichsweise hohe Temperatur des Arbeitsmediums M von etwa 1000°C bis 1600°C ausgelegt. Um

auch bei diesen, für die Materialien ungünstigen Betriebspa-  
rametern eine vergleichsweise lange Betriebsdauer zu ermög-  
lichen, ist die Brennkammerwand 153 auf ihrer dem Arbeitsme-  
dium M zugewandten Seite mit einer aus Hitzeschildelementen  
5 155 gebildeten Innenauskleidung versehen. Jedes Hitzeschil-  
delement 155 ist arbeitsmediumsseitig mit einer besonders hit-  
zebeständigen Schutzschicht ausgestattet oder aus hochtempe-  
raturbeständigem Material gefertigt. Aufgrund der hohen Tem-  
peraturen im Inneren der Brennkammer 110 ist zudem für die  
10 Hitzeschildelemente 155 bzw. für deren Halteelemente ein  
Kühlsystem vorgesehen.  
Auch die Hitzeschildelemente 155 können Löcher 7 beispiels-  
weise auch mit einem Diffusor 13 aufweisen, um das Hitze-  
schildelement 155 zu kühlen oder um brennbares Gas ausströmen  
15 zu lassen.

Die Materialien der Brennkammerwand und deren Beschichtungen  
können ähnlich der Turbinenschaufeln sein.

20 Die Brennkammer 110 ist insbesondere für eine Detektion von  
Verlusten der Hitzeschildelemente 155 ausgelegt. Dazu sind  
zwischen der Brennkammerwand 153 und den Hitzeschildelementen  
155 eine Anzahl von Temperatursensoren 158 positioniert.

**Patentansprüche**

1. Verfahren zur Herstellung eines Lochs (7) in einem Bauteil  
5 (1, 120, 130, 155) mittels gepulster Laserstrahlen (22),

dadurch gekennzeichnet, dass

das Verfahren in einer Vielzahl von Verfahrensschritten  
10 ausgeführt wird, und  
dass in einem der ersten Verfahrensschritte kleinere  
Laserpulslängen verwendet werden als in einem der letzten  
Verfahrensschritte.

15

2. Verfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet, dass

die Laserpulslänge während des Fortschreitens der Lochbildung  
20 von einer äußeren Oberfläche (14) des Bauteils (1)  
hin bis zur Tiefe des Lochs (7) kontinuierlich vergrößert  
wird.

25 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,

dadurch gekennzeichnet, dass

in einem ersten Verfahrensschritt Laserpulslängen kleiner  
100 ns, insbesondere kleiner 50 ns, und  
30 in einem der letzten Verfahrensschritte Laserpulslängen  
größer gleich 50 ns, insbesondere größer gleich 100 ns,  
und kleiner 10 ms verwendet werden.

35

4. Verfahren nach Anspruch 1,  
dadurch gekennzeichnet, dass

mit dem Verfahren ein Bauteil (1) bearbeitet wird,  
5 wobei das Bauteil (1) ein Schichtsystem darstellt.

5. Verfahren nach Anspruch 4,  
dadurch gekennzeichnet, dass

10 mit dem Verfahren ein Schichtsystem (1) bearbeitet wird,  
das aus einem metallischen Substrat (4) und zumindest  
einer keramischen Schicht (16) besteht.

15 6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5,  
dadurch gekennzeichnet, dass

20 das Schichtsystem (1) aus einem Substrat (4) und einer me-  
tallischen Schicht (16) besteht,  
die insbesondere eine Zusammensetzung des Typs MCrAlX auf-  
weist,  
wobei M für zumindest ein Element der Gruppe Eisen, Kobalt  
oder Nickel steht,  
25 sowie X für Yttrium und/oder zumindest ein Element der  
Seltenen Erden steht.

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6,  
30 dadurch gekennzeichnet, dass

das Schichtsystem (1) aus einem Substrat (4) und einer  
Schicht (16) besteht,  
die eine metallische Zwischenschicht und eine äußere kera-  
35 mische Schicht aufweist.

8. Verfahren nach Anspruch 5 oder 7,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
die keramische Schicht (16) eine Wärmedämmsschicht ist.

5

9. Verfahren nach Anspruch 5, 6, 7 oder 8,  
dadurch gekennzeichnet, dass

10 das Substrat (4) eine nickel-, kobalt- oder eisenbasierte  
Superlegierung ist.

10. Verfahren nach Anspruch 1,  
dadurch gekennzeichnet, dass

15 mit dem Verfahren ein Bauteil (1) bearbeitet wird,  
das eine Turbinenschaufel (120, 130),  
eine Brennkammerauskleidung (155) oder  
ein anderes Bauteil  
20 einer Gas- (100) oder Dampfturbine ist.

11. Verfahren nach Anspruch 1 oder 10,  
dadurch gekennzeichnet, dass

25 das Verfahren bei der Neuherstellung eines Bauteils (1,  
120, 130, 155) verwendet wird.

30

12. Verfahren nach Anspruch 1 oder 10,  
dadurch gekennzeichnet, dass

35 das Verfahren bei einem wiederaufzuarbeitenden Bauteil (1,  
120, 130, 155) verwendet wird.

13. Verfahren nach Anspruch 1,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

zumindest zwei, insbesondere mehrere Laser (19, 19'), die  
5 verschiedene Bereiche von Laserpulslängen erzeugen können,  
verwendet werden.

14. Verfahren nach Anspruch 1,

10 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

zuerst ein äußerer Oberbereich (13) des Lochs (7) mit  
kleinen Laserpulslängen erzeugt wird,  
und dann ein zweiter Teilbereich (10) des Lochs (7) mit  
15 größeren Laserpulslängen erzeugt wird.

15. Verfahren nach Anspruch 1,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

20

in einem ersten Verfahrensschritt ein äußerer Oberbereich  
(28),  
dann in einem der letzten Verfahrensschritte ein innerer  
Bereich (25) des Lochs (7) erzeugt wird.

25

16. Vorrichtung (40) zur Bearbeitung eines Bauteils (1),

insbesondere nach einem oder mehreren der vorherigen  
Ansprüche,

30

bestehend aus zumindest zwei Lasern (19, 19'), die  
verschiedene Laserpulslängen erzeugen.

17. Vorrichtung nach Anspruch 16,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass  
die Vorrichtung (40) zumindest einen Spiegel (31, 33) auf-  
weist,  
der verwendet wird, um einen Laserstrahl (22) auf das zu  
bearbeitende Bauteil (1) zu lenken.

10 18. Vorrichtung nach Anspruch 16 oder 17,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass  
die Vorrichtung zumindest eine Optik (35),  
insbesondere eine Optik (35), aufweist,  
15 die die Laserstrahlen (22', 22'') der Laser (19, 19') auf  
das Bauteil (1) steuert.

19. Vorrichtung nach Anspruch 16 oder 17,  
20 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass  
die Vorrichtung zumindest eine Optik (35) aufweist,  
so dass die Laserstrahlen (22', 22'') der Laser (19, 19')  
gleichzeitig auf das Bauteil (1) gelenkt werden.

1 / 8

FIG 1

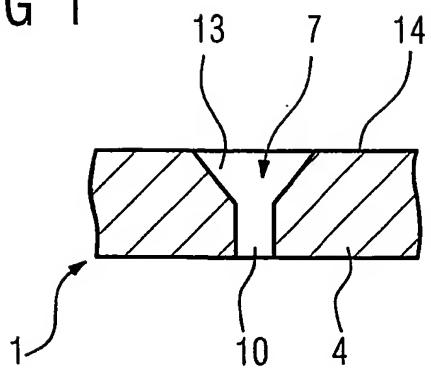
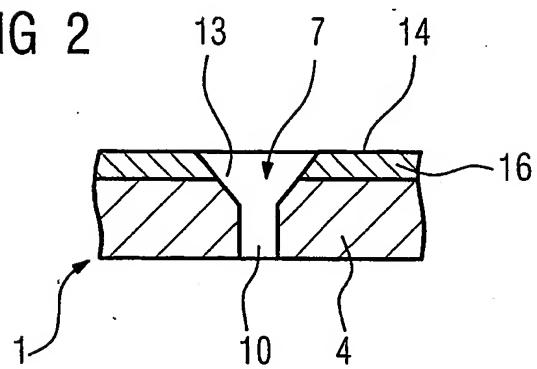


FIG 2



2 / 8

FIG 3

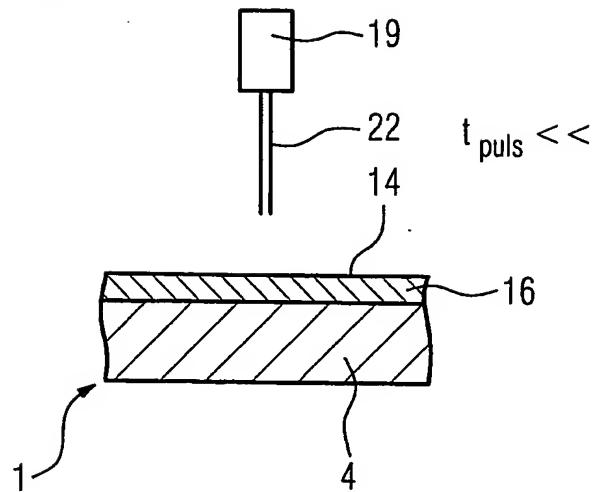


FIG 4

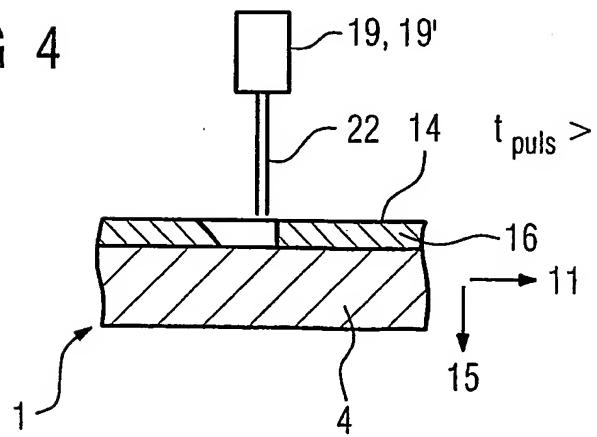


FIG 5

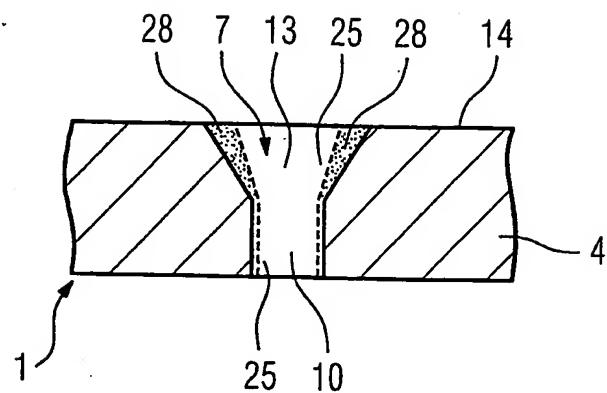
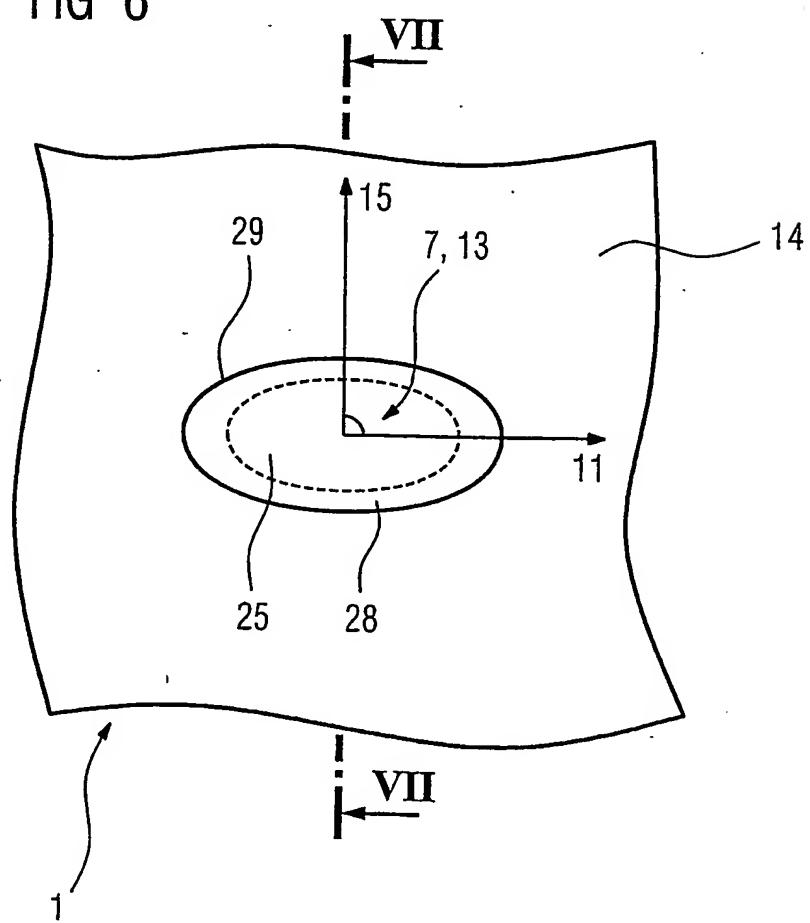


FIG 6



4 / 8

FIG 7

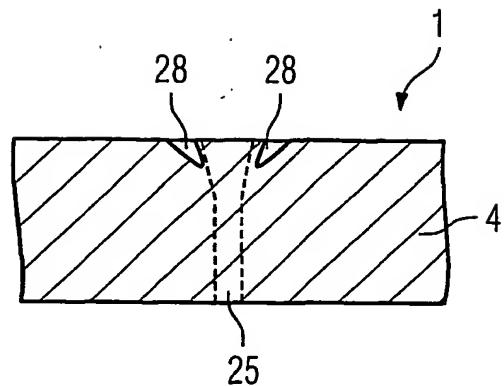


FIG 8

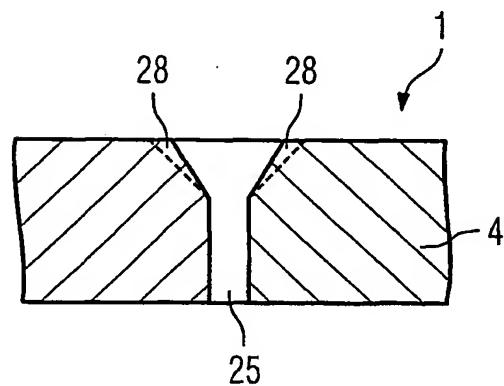


FIG 9

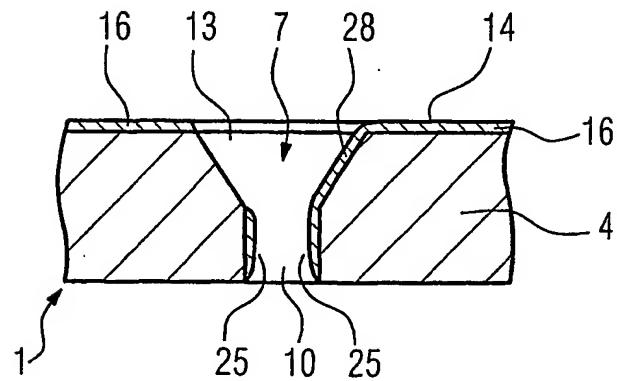


FIG 10

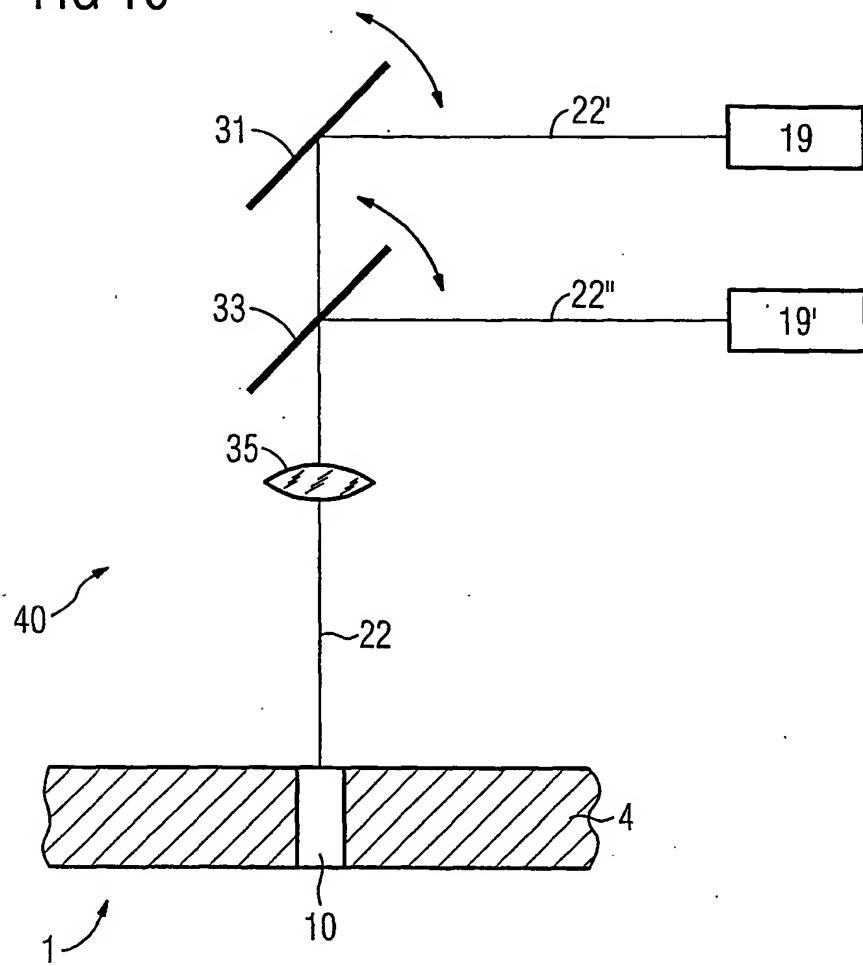
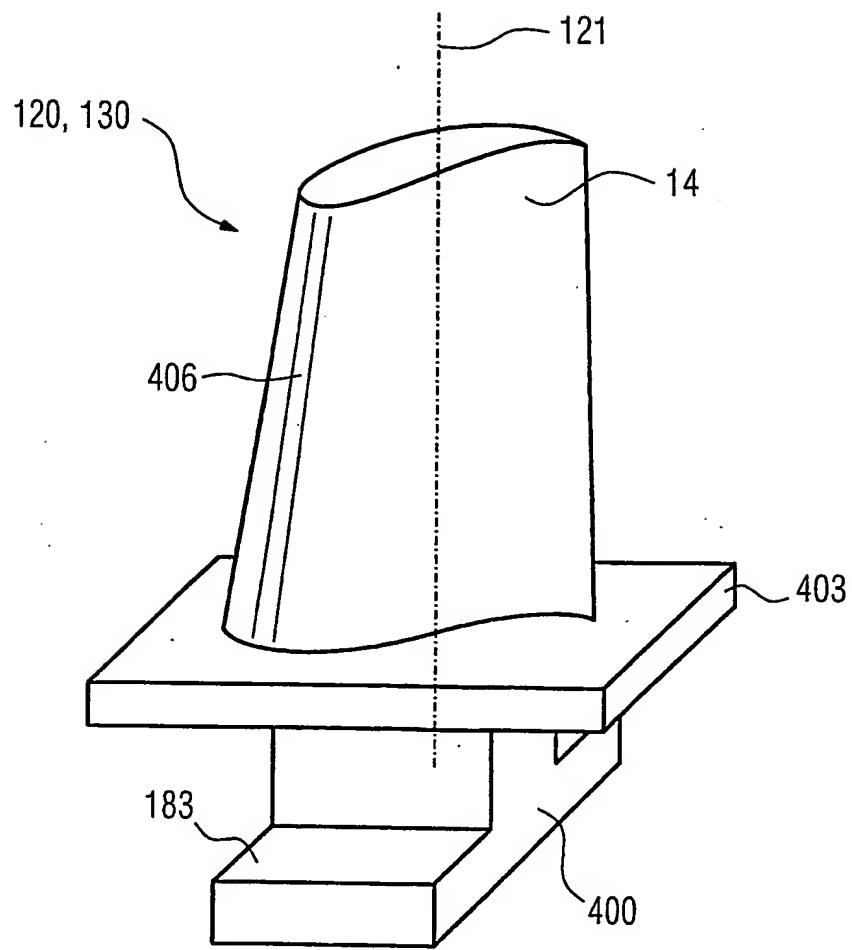


FIG 11



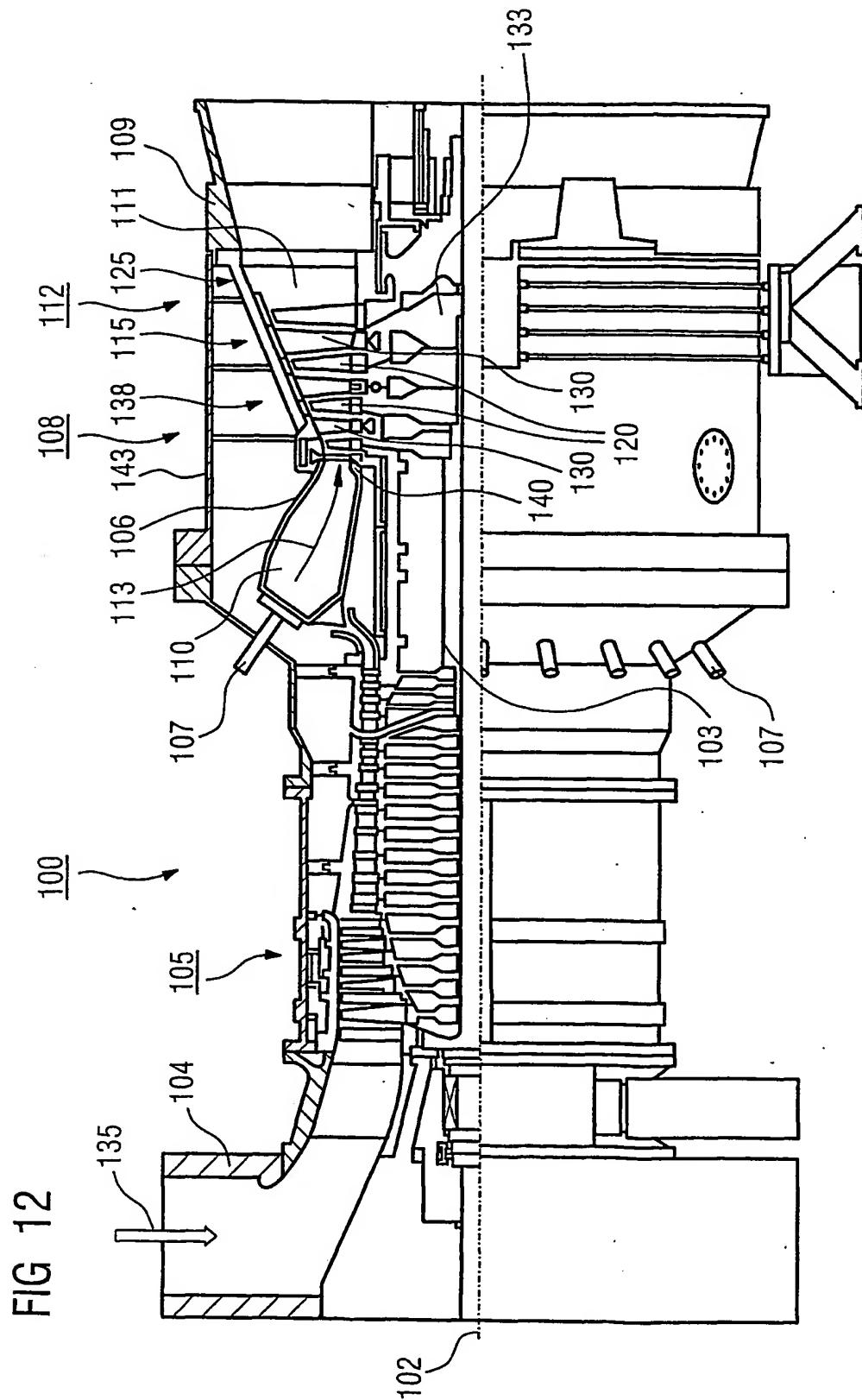


FIG. 13

